

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.7>

УДК: 01.04.03; 05.13.18; 09.03.02

ИМИТАТОР ФОНО-ЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ НАД МОРСКОЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В СРЕДЕ ENGEE PTC

Д.А. Балакин ^{1,2}, В.Ю. Семенов ^{1,3}, А.П. Стельмах ⁴, И.Г. Тильки ¹

**¹ ООО ЦИТМ «Экспонента»,
115280, Москва, ул. Ленинская Слобода, д. 19, помещ. 62/1**

**² ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ»,
111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1**

**³ ФГАОУ ВО ННГУ им. Н. И. Лобачевского,
603022, Нижний Новгород, пр.Гагарина, 23**

**⁴ ООО «Ритм»,
121205, Москва, Большой б-р, д. 42 стр. 1,**

Статья поступила в редакцию 15 июля 2025 г.

Аннотация. В статье излагаются основные принципы построения модели имитатора фоно-целевой обстановки распространения радиоволн над морской подстилающей поверхностью. Рельеф морской поверхности формируется на основе нормированной эффективной площади рассеяния и спектра Эльфохейли. В качестве модели распространения радиоволн выступает метод, основанный на параболическом волновом уравнении. Модель-имитатор учитывает: рельеф морской поверхности, высоты профиля приповерхностного и приподнятого волноводов, профиль показателя преломления воздуха, провалы при различном волнении моря, траекторию движения цели над морем. В качестве инструмента выступает САПР ENGEE PTC. Модель реализована и интегрирована в комплекс полунатурного моделирования РИТМ.

Ключевые слова: ENGEE PTC, имитатор, КПИМ РИТМ, морская поверхность, параболическое уравнение, фактор распространения.

Финансирование: Соглашение №020-11-2025-479 от 27 мая 2025 года о предоставлении российской организации субсидии на финансовое обеспечение мероприятий по проведению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области средств производства электроники, заключенного между Обществом с ограниченной ответственностью «РИТМ» (Получатель субсидии) и Министерством промышленности и торговли Российской Федерации (идентификатор государственного соглашения о предоставлении субсидии 0000000002025PDC0002), заключенного на основании Решения о порядке предоставления субсидии от 14 октября 2024 года №23-67771-00835-Р согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 25 октября 2023 года №1780 (Правила предоставления субсидии).

Автор для переписки: Балакин Дмитрий Александрович, balakin@exponenta.ru

Введение

Научное исследование проблемы распространения радиоволн в реальных условиях окружающей среды остается актуальной темой на сегодняшний день. Особенно остро она стоит при разработке и тестировании современных радиолокационных средств, когда антенны приемных и передающих модулей располагаются на небольшой высоте над поверхностью. Показательным примером является противокорабельная ракета, которая летит на высоте в единицы метров над поверхностью моря. Такая траектория движения, особенно на конечном участке, существенно уменьшает возможность ее обнаружения. В связи с этим, необходимо усовершенствовать старые алгоритмы обнаружения, а иногда и разработать новые методы и подходы к детектированию таких объектов. Для достижения этих целей необходимо учитывать все эффекты, обусловленные особенностями распространения радиоволн (РРВ). Ситуация существенно осложняется, если в качестве подстилающей поверхности выступает море, за счет своего многообразия (за частую стохастического) рельефа или формы поверхности снижается эффективность классических методов обнаружения.

Одним из часто возникающих процессов при РРВ над морской поверхностью – сверхрефракция. Механизм возникновения сверхрефракции можно объяснить инверсией температуры (уменьшение температуры в направлении к земной и водной поверхности). Особенно часто это явление можно наблюдать в ясную безветренную погоду, днем и ночью воздух у поверхности моря оказывается более холодным и влажным, чем воздух на высоте. Кроме того, в летний период при антициклоне воздух движется с континента на море и, будучи вначале очень сухим, вызывает испарение с поверхности моря и резкое падение давления с высотой в нижнем слое атмосферы [1]. Эти тепловые перепады между водой и находящимися над ней слоями воздуха, а также высокие градиенты влажности приводят к более резкому, чем при нормальной рефракции, уменьшению скорости распространения по направлению к поверхности, т.е. к более резкому увеличению кривизны луча [1].

Другим важным процессом при РРВ является волноводное распространение. Принято выделять два основных типа волноводного распространения: поверхностные и приподнятые.

Поверхностные волноводы обычно формируются в слоях на высотах до нескольких сотен метров, а иногда и в слоях, прилегающих к поверхности. Они обеспечивают распространение радиоволн с частотами выше 100 МГц на расстояния, намного превышающие пределы радиогоризонта. Сверхдальняя радиолокация [2] обусловлена волноводами именно этого типа. Приподнятые волноводы формируются в захватывающих слоях, расположенных несколько выше. В этих случаях, из-за большой высоты расположения слоя или малых изменений градиента в пределах слоя, приповерхностный волновод не образуется. Приподнятые волноводы также, как и приповерхностные, влияют на распространение радиоволн с частотами, превышающими 100 МГц, но увеличение дальности обнаружения происходит, в основном для РЛС и объектов, расположенных в самом волноводе. Чаще всего они расположены ниже 3 км, но встречаются и на высотах до 6 км [2].

Волнения моря можно описать как случайный процесс, таким образом, принимаемый сигнал является случайной величиной. Поэтому в расчетах учитываются средние по ансамблю и средние по времени величины поля и мощности. Средние по ансамблю – это средние значения для различных реализаций поверхности океана, каждая из которых генерируется как выборка случайного процесса, описывающего поверхность. Однако средние значения по времени представляют собой средние значения за определенный период времени. Поскольку данные о поверхности моря в определенное время коррелируют с показателями в более раннее время, средние значения по времени отличаются от средних значений по ансамблю в течение ограниченного периода времени [3]. В результате удобно разделить коэффициент распространения на когерентную и некогерентную составляющие. В задаче рассеяния на шероховатой поверхности некогерентная мощность зависит от случайных изменений поверхности. Соответственно, когерентная составляющая является доминирующей для профиля гладкой поверхности, тогда как некогерентная составляющая может доминировать для профиля шероховатой поверхности. Как показывает практика [3], в условиях малой скорости ветра, а значит большей шероховатости (на воде образуется рябь), наблюдаем картину многолучевого замирания из-за интерференции между прямой и зеркально отраженной волной. Однако в случае высокой скорости ветра профиль шероховатой поверхности вызывает уменьшение коэффициента зеркального отражения, так что когерентная мощность исчезает при больших углах скольжения. Это происходит из-за повышенной случайности в принимаемом поле, что, в свою очередь, приводит к большей некогерентной мощности.

Из сказанного ясно, что необходимо учитывать разнообразные факторы при разработке имитатора РРВ над морской поверхностью. На рис. 1 представлены модули, которые формируют облик имитатора.



Рис. 1. Модули имитатора РРВ над морской поверхностью.

Одним из основополагающих модулей является модуль построения рельефа морской поверхности. Поэтому далее рассмотрим его более подробно.

1. Модуль построения рельефа морской поверхности

В имитаторе морская поверхность (МП) формируется в три основных этапа (рис. 2). На первом этапе осуществляется расчет нормированной эффективной площади рассеяния (ЭПР) – σ^0 (удельная ЭПР), а также спектр МП – $S(k)$. На следующем этапе на основе полученных характеристик рассчитывается рельеф МП – $P(x, y, z)$ в виде трехмерной поверхности. На заключительном – выбирается сечение рельефа МП, в результате имеем функцию высоты от расстояния – $z(x)$.

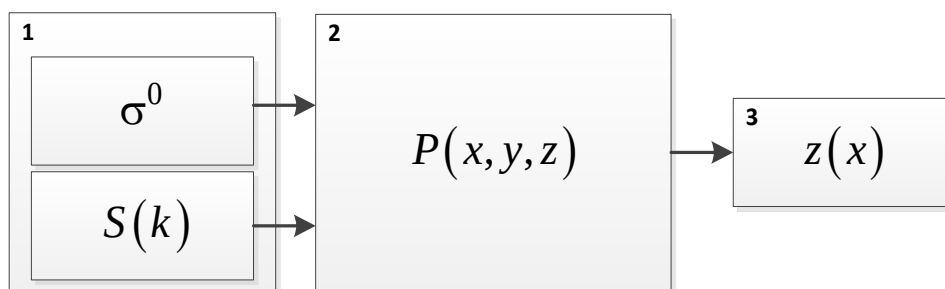


Рис. 2. Блок-схема формирования рельефа морской поверхности.

Наиболее важным этапом формирования МП является первый этап, так как именно на нем закладываются основные статистические характеристики МП. Поэтому рассмотрим его более подробно.

Одним из важнейших параметров, характеризующий отражение электромагнитной энергии от МП – это ЭПР. На практике, ЭПР является экспериментальной величиной, кроме того, рельеф МП представляет собой одну из реализаций случайного процесса в некоторый момент времени и в заданном пространстве. Поэтому для моделирования целесообразно перейти к нормированной ЭПР или сигма-нулевое (σ^0), которая определяется как отношение экспериментально измеренной ЭПР к площади облучаемой МП. Значение σ^0 зависит от следующих параметров: состояние моря, угол скольжения, поляризация, частота РЛС и другие [4]. Поскольку σ^0 – это эмпирическая величина, то для полноценного моделирования требуется сглаживание экспериментальных ошибок, в следствие этого, часто рассматривают эмпирические модели. На рисунках 3а и 3б представлены значения σ^0 при малых угла скольжения с учетом различных эмпирических моделей, а также при горизонтальной и вертикальной поляризации при несущей частоте 10 ГГц.

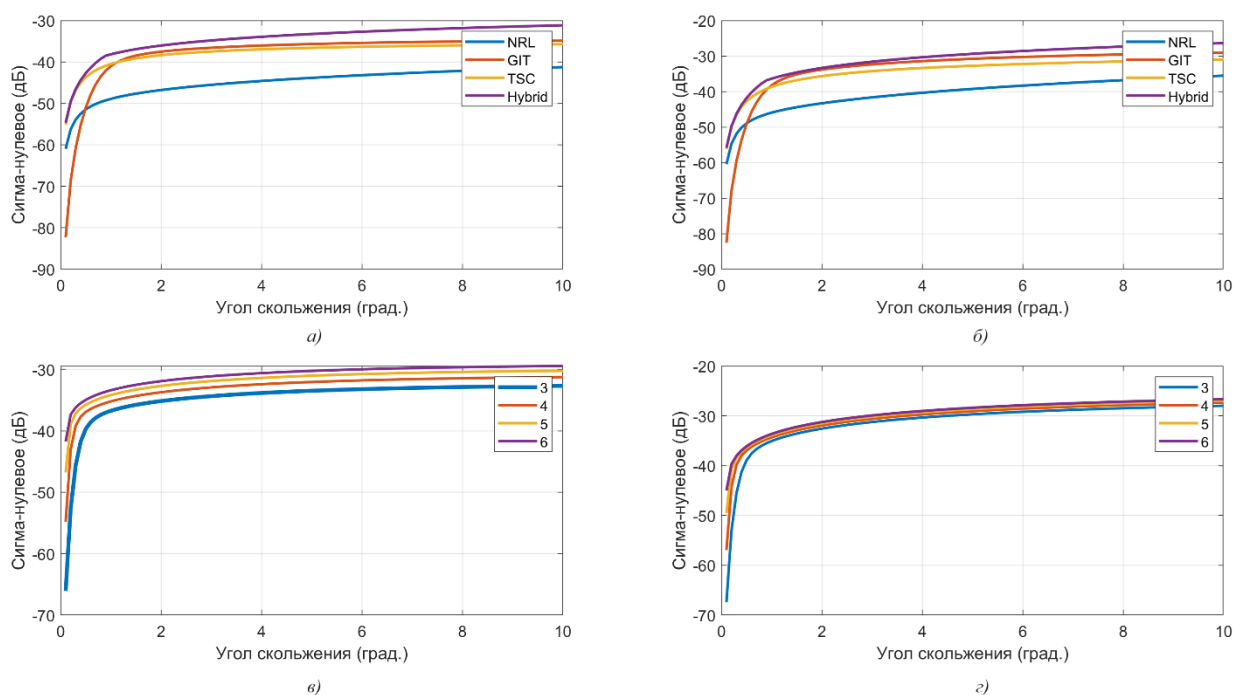


Рис. 3. Значения нормированной ЭПР от угла скольжения:
 а) – при горизонтальной поляризации с учетом эмпирических моделей,
 в) – при горизонтальной поляризации с учетом состояния моря,
 г) – при вертикальной поляризации с учетом состояния моря.

Модель GIT (Georgia Institute of Technology) представляет собой кусочно-непрерывную модель для прогнозирования σ^0 как для горизонтальной, так и для вертикальной поляризации. Она охватывает довольно широкий диапазон частот 1–100 ГГц, при углах скольжения от 0,1 до 10 градусов. Другие модели базируются на эмпирической таблице Натансона [5]: гибридная модель (Hybrid), модель TSC (Technology Service Corporation) и модель NRL (Naval Research Laboratory) [6]. Гибридная модель сочетает в себе функции данных Натансона и модели GIT. Она действительна для углов скольжения 0,1–30 градусов, состояния моря 3–6 баллов, частот от 0,5 до 35 ГГц для различных типов поляризации. Модель TSC рассматривает σ^0 как сумму квазизеркального отражения (вносит существенный вклад при больших углах скольжения) и диффузного рассеяния при малых углах скольжения. Модель NRL [7] представляет собой эмпирическую модель морских помех, основанную на таблицах Натансона, она охватывает как горизонтальную, так и вертикальную поляризацию, частоты от 0,5 до 35 ГГц, состояние моря 2–6 баллов и углы

скольжения от 0,1 до 60 градусов. По умолчанию в имитаторе используется GIT модель. На рисунках 4б и 4в представлены значения σ^0 на основе GIT модели при четырех состояниях моря от 3 до 6 баллов.

Вследствие воздействия ветра спокойная МП (зеркальная поверхность) становится неровной, что влечет за собой обратное рассеяние ЭПМ от МП. Поэтому для точного физического моделирования необходимо учитывать тонкую структуру МП, т.е. непосредственно рассматривать взаимодействие электромагнитного поля (ЭМП) с геометрией реального рельефа.

Принято рассматривать МП как суперпозицию бесконечного числа элементарных волн с различными амплитудами, частотами, фазами, а также направлением распространения ЭМП [8]. В связи с этим, одним из эффективных подходов моделирования МП являются спектральные методы. Двумерный энергетический спектр выражается через произведение [9]:

$$S(k, \theta) = S(k)B(k, \theta), \quad (1)$$

где $S(k)$ – радиальный спектр, $B(k, \theta)$ – угловой спектр, k – пространственное волновое число.

В нашем случае в качестве одного из параметров выступает радиальный спектр, так как именно он используется на первом этапе формирования МП (рис. 1).

На практике, выделяют три основных метода построения $S(k)$:

- на основе спектра Пирсона-Московица;
- на основе спектра JONSWAP;
- на основе спектра Эльфохейли.

Спектр Пирсона-Московица равен [10]:

$$S_{P-M}(k, U_{19}) = \frac{\alpha}{2k^3} \exp\left(-\frac{\beta g^2}{k^2 U_{19}^4}\right), \quad (2)$$

где $\alpha = 0.0081$, $\beta = 0.74$, $g = 9.8 \text{ м} / \text{с}^2$ – ускорение свободного падения, также в качестве одного из параметров выступает скорость ветра на высоте 19.5 м над уровнем моря – U_{19} .

Достоинством модели (2) является ее простота реализации, а также во многих случаях она отражает физику МП. Для улучшения модель (2) вводят безразмерный параметр пиковатости [10], который способствует увеличению точности расчета на низких частотах, тогда модель (2) переходит в модель МП на основе спектра JONSWAP:

$$S_{JONSWAP}(k, U_{19}) = K S_{P-M}(k, U_{19}) \gamma^r, \quad (3)$$

где K – поправочный коэффициент, $r = \exp \left(- \frac{\left(\sqrt{\frac{k U_{19}^2}{g}} - 1 \right)^2}{2\sigma^2} \right)$,

в свою очередь, параметр σ определяется как:

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{при } \sqrt{gk} \leq g/U_{19} \\ 0.09 & \text{при } \sqrt{gk} > g/U_{19} \end{cases}.$$

Модель МП на основе спектра JONSWAP, как и Пирсона-Московица использует измеренные скорости ветра U_{19} . Кроме того, JONSWAP характеризуется умеренными ветрами и ограниченными ветровыми расстояниями.

Существенная проблема моделей (2) и (3) состоит в том, что не учитывается высокочастотные компоненты спектра или короткие волны – капиллярные волны (рис. 4).

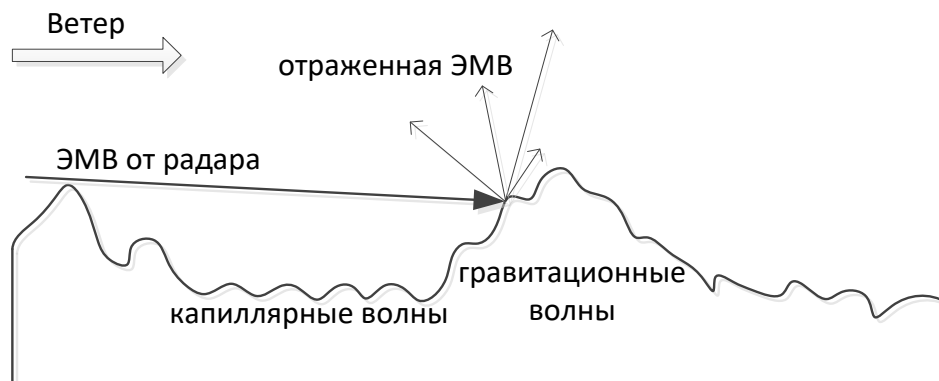


Рис. 4. Взаимодействие морской поверхности с электромагнитными волнами.

Как можно увидеть из рис. 4, МП состоит из суммы двух типов волн: капиллярных и гравитационных. Капиллярная волна (также называемая рябью или капиллярной рябью) – волна, скорость которой главным образом определяется поверхностным натяжением жидкости морской воды, длиной менее 2,5 см. Гравитационная волна – волна, скорость распространения которой определяется в первую очередь гравитационными эффектами, длиной более 2,5 см.

Капиллярные волны вносят основной вклад в среднеквадратичный наклон МП, а значит в рассеянное ЭМП. Для учета капиллярного эффекта рассмотрим модель построения МП на основе спектра Эльфохейли.

Модель на основе спектра Эльфохейли позволяет объединить большие и малые волны, в результате спектра Эльфохейли можно представить в виде суммы низкочастотной и высокочастотной составляющих [10]:

$$S_E(k, U_{19}) = \frac{1}{k^3} (B_l(k, U_{19}) + B_h(k, U_{19})), \quad (4)$$

где $B_l(k, U_{19})$ – низкочастотная составляющая спектра, $B_h(k, U_{19})$ – высокочастотная составляющая спектра. Не вдаваясь в подробности математической реализации $B_l(k, U_{19})$ и $B_h(k, U_{19})$ (подробно можно ознакомиться в [10]), рассмотрим спектральные диаграммы. На рис. 5 представлены спектры МП при $U_{19} = 10.26 \text{ м/с}$.

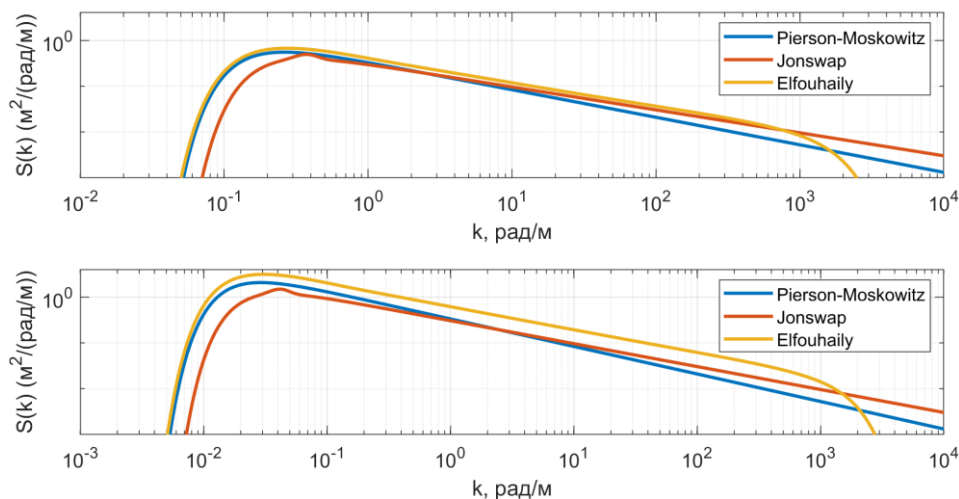


Рис. 5. Спектры морской поверхности для моделей Пирсона-Московица, JONSWAP, Эльфохейли при скорости ветра 5.16 м/с и 15.39 м/с.

На рассмотренных моделях спектр Эльфохейли показал свою функциональность при построении длинных и средних морских волн, также он гораздо эффективнее по сравнению со спектром Пирсона-Московица и JONSWAP в моделировании природы морской поверхности при малой балльности, так как высокочастотную составляющую морской поверхности можно рассмотреть отдельно (4). Поэтому в качестве $S(k)$ (рис. 3) в имитаторе применяем $S_E(k, U_{19})$. Ниже на рис. 6 представлены результаты 2 и 3 этапа работы имитатора МП (рис 1.).

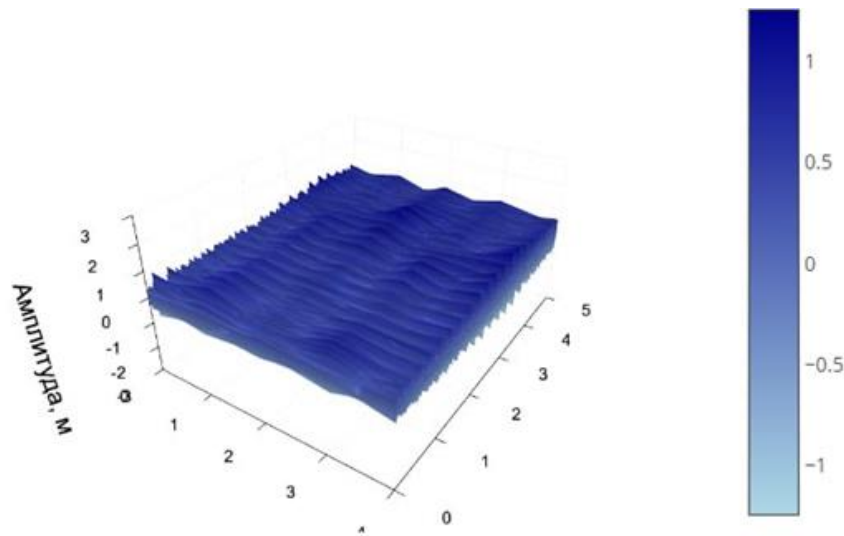


Рис. 6. Результаты работы модуля формирования МП.

Далее в соответствии со структурной схемой рассмотрим выбор и реализацию метода расчета РРВ.

2. Моделирования распространения радиоволн

В качестве метода моделирования РРВ в имитаторе выступает параболическое волновое уравнение (ПВУ), которое численно решает уравнение Гельмгольца [11]:

$$\nabla^2 \dot{\Psi} + \omega^2 \mu_a \varepsilon_a \dot{\Psi} = 0, \quad (5)$$

Для детального понимания базовых принципов метода ПВУ рассмотрим декартовую систему координат. Также отметим, что будем рассматривать РРВ в двумерном пространстве, в котором ЭМП не зависит от поперечного

направления (рис. 7). Такое допущение позволяет разложить электрическую и магнитную составляющие на горизонтальные и вертикальные составляющие независимые друг от друга из-за отсутствия эффекта деполяризации [11]. Тогда можно ввести поле:

$$\psi(x, z) = \begin{cases} E_y(x, z) & - \text{горизонтальная поляризация} \\ H_y(x, z) & - \text{вертикальная поляризация} \end{cases}. \quad (6)$$

Запишем однородное уравнение Гельмгольца (5) с учетом (6):

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 n(x, z)^2 \right) \psi(x, z) = 0, \quad (7)$$

где $k_0 = 2\pi / \lambda$ – волновое число, $n(x, z)$ – показатель преломления, x – параксиального направления или направление вдоль земли (воды), а z – высота над поверхностью. На рисунке 3.20 схематично изображен процесс РРВ.

При решении уравнения (7) вводят следующие ограничения:

- поле $\psi(x, z)$ не зависит или линейно зависит от y (единичный обзор локатора в одном направлении); таким образом, мы пренебрегаем любым рассеянием вокруг объектов и будем рассматривать только рассеяние, происходящее над объектами (так как работаем в двумерном пространстве, для трехмерного, выполняем расчет во всех направлениях, а затем объединяем их);

- показатель преломления $n(x, z)$ постоянен во всей области или медленно меняется в зависимости от x и z .

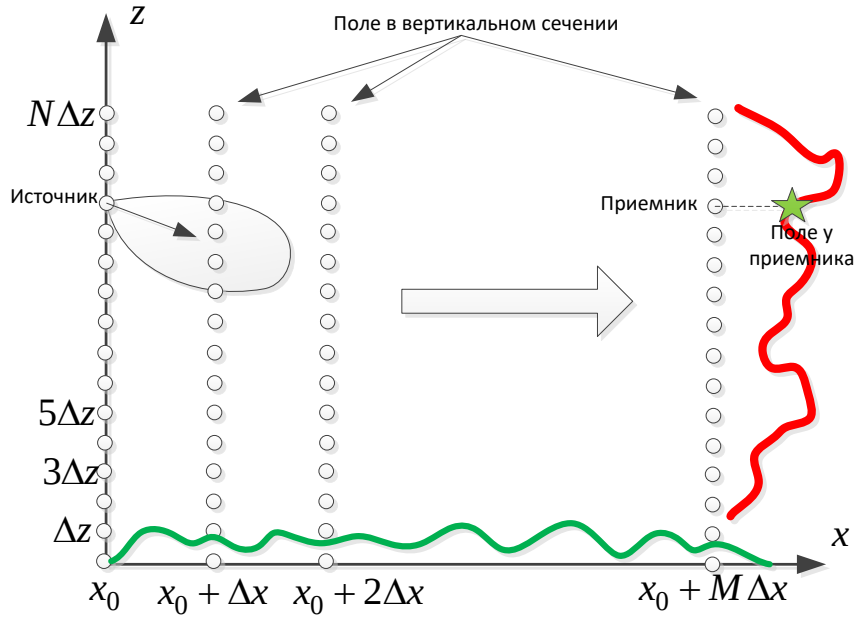


Рис. 7. Картина двумерного распространения ЭМВ.

С учетом того, что волна распространяется по гармоническом закону вдоль оси x $u(x, z) = \psi(x, z) \exp(-jk_0 x)$ уравнение (9) имеет следующий вид:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + 2jk_0 \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 (n(x, z)^2 - 1) \right) u(x, z) = 0. \quad (8)$$

В [12] показано, что расчет (8) осуществляется на основе преобразования Фурье или метода SSFM (split-step Fourier method):

$$u(x + \Delta x, z) = \exp \left(\frac{jk_0 \Delta x}{2} \left[n^2 \left(x + \frac{\Delta x}{2}, z \right) - 1 \right] \right) \cdot \left(F^{-1} \left\{ \exp \left(-\frac{j \Delta x f_z^2}{2k_0} \right) F \{ u(x, z) \} \right\} \right). \quad (9)$$

Этот метод является пошаговым, т.е. последующее значение поля в точке вычисляется из предыдущего. Таким образом, учитывая поле в начальной точке $U(x_0 = 0, z)$ рис. 6, SSFM позволяет вычислить всю область пространства. Особенность этого метода в том, что половина шага происходит в пространственной области, а другая часть – в области Фурье или частотной [13]. В имитаторе в качестве метода моделирования РРВ применяется (9). Далее рассмотрим результаты моделирования

3. Результаты моделирования

Для проверки работоспособности предлагаемой модели распространения радиоволн над морской поверхностью было проведено численное моделирование. Оно проводилось для несущей частоты 3 ГГц и ширине диаграммы направленности в угломестной плоскости в 10 градусов. Переменными параметрами выступали высота расположения передатчика РЛС, скорость ветра, а также толщина приповерхностного волновода (при его наличии). Имитатор был реализован в среде Engsee [14] в рамках проекта Engsee RTC.

Модуль расчета интерференционной картины позволяет рассчитать фактор распространения волны в двумерной плоскости в осях наклонная дальность – высота и отобразить распределение этой величины цветом. Так же имеется возможность сделать сечение этой величины в любой из этих двух плоскостей. На рис. 8а приведены результаты расчета фактора распространения сигнала.

Модуль дифракции рассчитывает те же графики, что и модуль интерференции, однако в него можно добавить объект, расположенный на поверхности моря стандартной формы. На этом объекте и происходит дифракция волн. На рис. 8б приведен результат работы модуля, когда объектом дифракции выступает идеально отражающий равнобедренный треугольник. На море был штиль.

Модуль расчета рефракции позволяет учесть не только наличие некоторого высотного профиля градиента показателя преломления, но и наличия приповерхностного или приподнятого волноводов. Это наиболее интересный случай для морских РЛС. На рис. 9 приведены результаты расчета фактора распространения на дальности до 100 км при наличии приповерхностного волновода, М-профиль которого приведен на рисунке 9. Интерференционные провалы представлены двумя графиками, первый – это одна из реализаций, а второй – это средний.

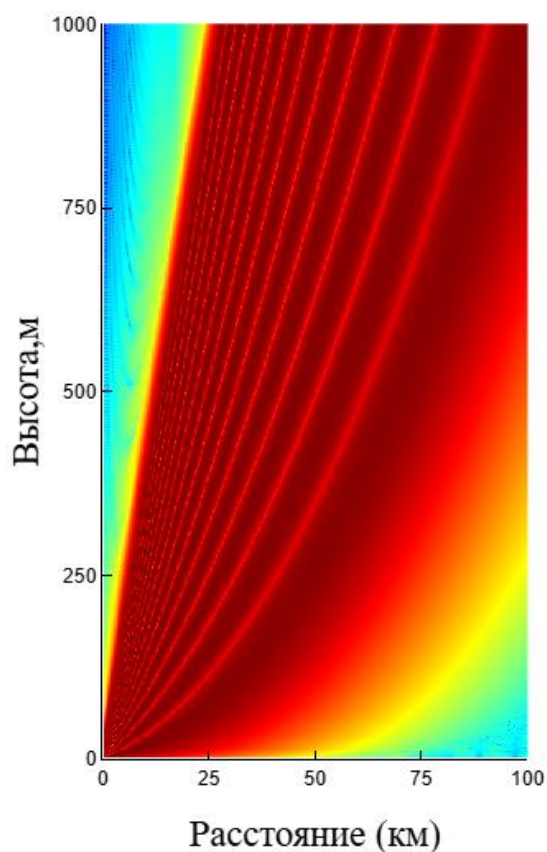


Рис. 8а. Фактор распространения по пространству при интерференции.

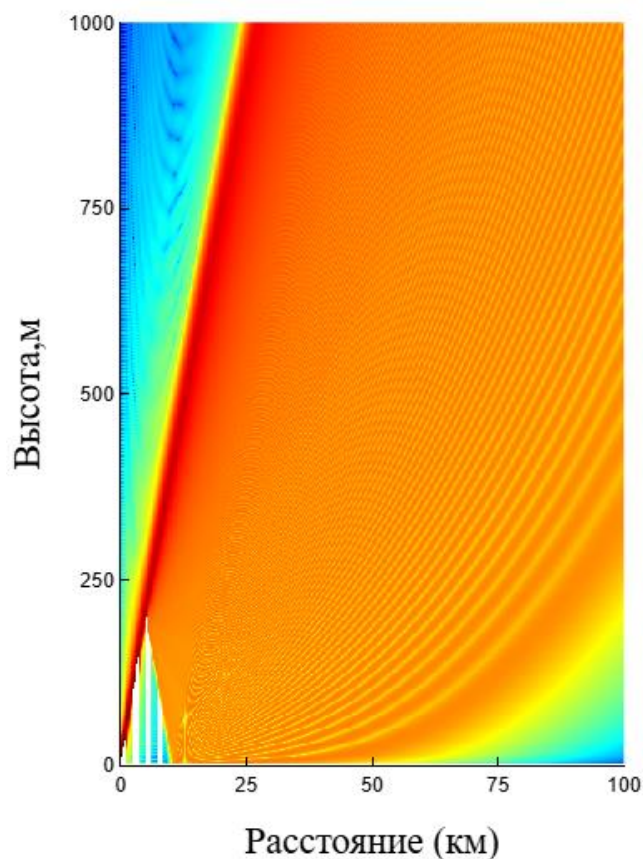


Рис. 8б. Фактор распространения по пространству при дифракции на треугольнике.

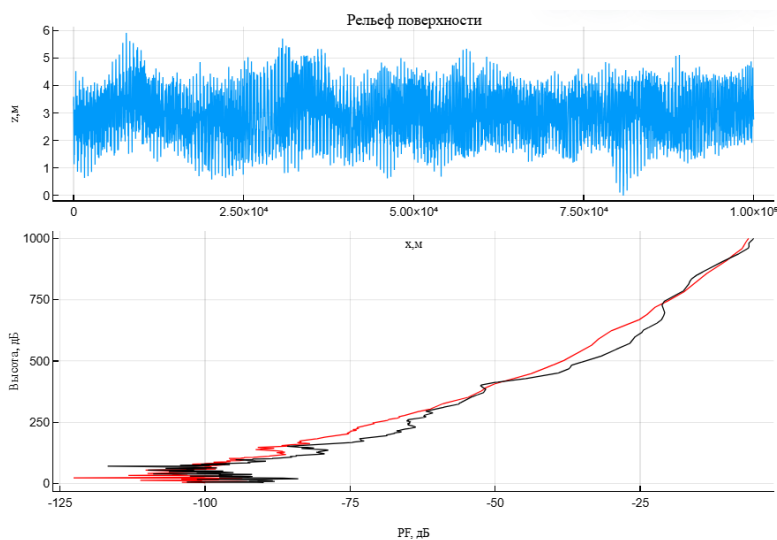
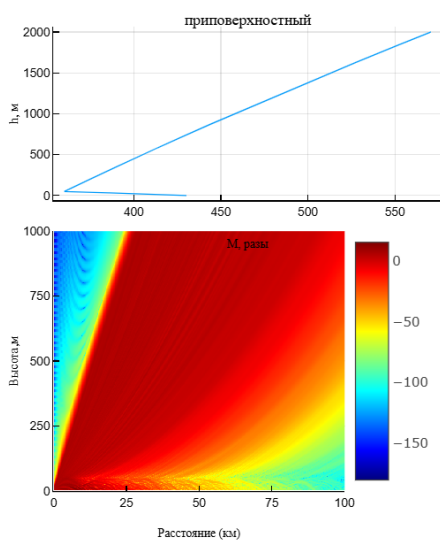


Рис. 9. Фактор распространения по пространству при рефракции в приповерхностном волноводе.

В работе предлагается оригинальная модель построение имитатора отраженного сигнала от надводной цели, располагающейся над морской поверхностью. Предполагается, что радар является однопозиционным и импульсно-доплеровским.

Основная особенность модели – это учет пассивной помехи (клаттера), которая формируется за счет облучения постоянно изменяющегося профиля морской поверхности. Вторая особенность – это расчет сигнала, облучающего цель. Он выполняется также с учетом возникающих эффектов интерференции и дифракции от подстилающей поверхности за счет применения SSPE метода.

Основное ограничения предлагаемой модели – это применение в расчете заранее известной эффективной поверхности рассеяния цели. Блок-схема модели имитатора приведена на рис. 10.

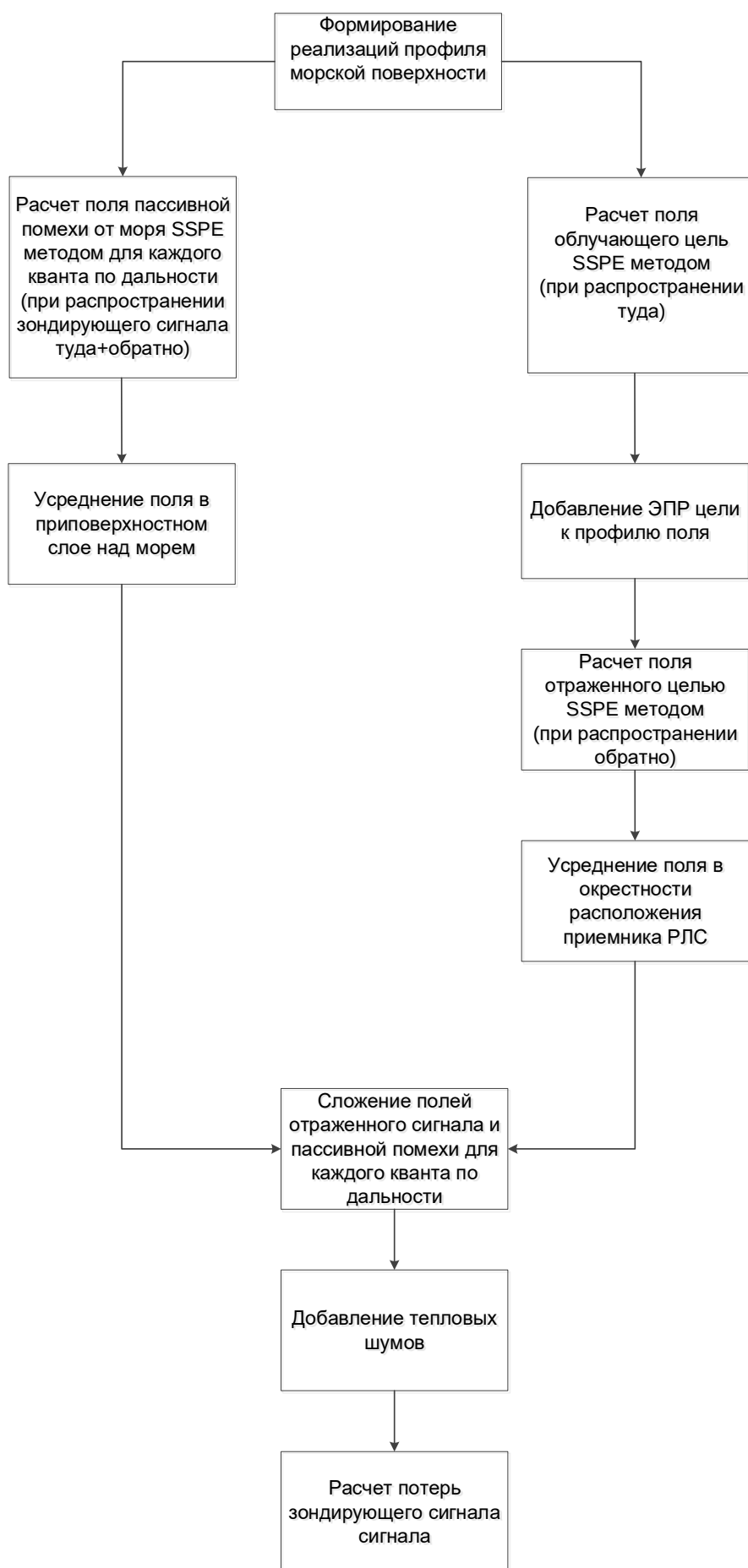


Рис. 10. Блок схема имитатора.

Ширина луча диаграммы направленности в данном случае по углу места составляла 2 градуса. Высота расположения передатчика радара равнялась 10 м, механический угол наклона полотна антенны относительно горизонта равнялся плюс 1 градус. Истинная дальность до цели составляла 2 км, высота ее расположения равнялась 9 км, ЭПР равнялся 15 дБ/см². На рис. 11 представлен полученный в результате работы имитатора амплитудно-дальностной портрет при скорости ветра в 9,7 м/с. Имитировалось 4 периода зондирования обычным радиоимпульсом длительность которого соответствовала полосе частот приемника в 3 МГц. Передатчик формировал сигнал с горизонтальной поляризацией.

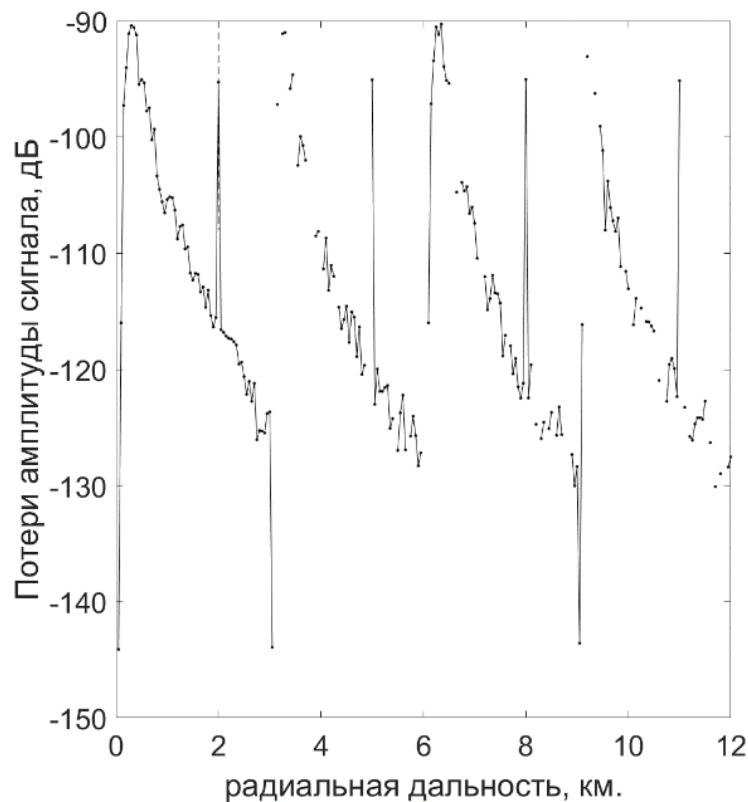


Рис. 11. Пример результатов работы имитатора под углом механического наклона +1 град.

Пропущенные точки на дальностно-временном портрете свидетельствуют о том, что потери сигнала составляют более 200 дБ, т.е. это и моменты с «глубокими замираниями» сигнала, возникающие из-за волнения морской поверхности.

Поскольку луч диаграммы направленности ориентирован под углом $+1$ градус от горизонта (т.е. не в сторону морской поверхности), это означает что морская поверхность облучается боковым лепестком диаграммы направленности. Как видно из рис. 11 максимальный уровень пассивных помех от моря составляет порядка -90 дБ, а дальности порядка 500 м.

На рис. 12 приведены результаты моделирования с аналогичными параметрами за исключением механического наклона полотна антенны, он изменен на $+10$ градусов. Видно, что максимальный уровень пассивных помех от моря уменьшился почти на 25 дБ. Он составил уже -115 дБ, причем на дальности порядка 1 км. Объясняется это тем, что из-за изменения механического наклона поверхность моря начала облучаться одним из следующих боковых лепестков меньшего уровня, чем первый.

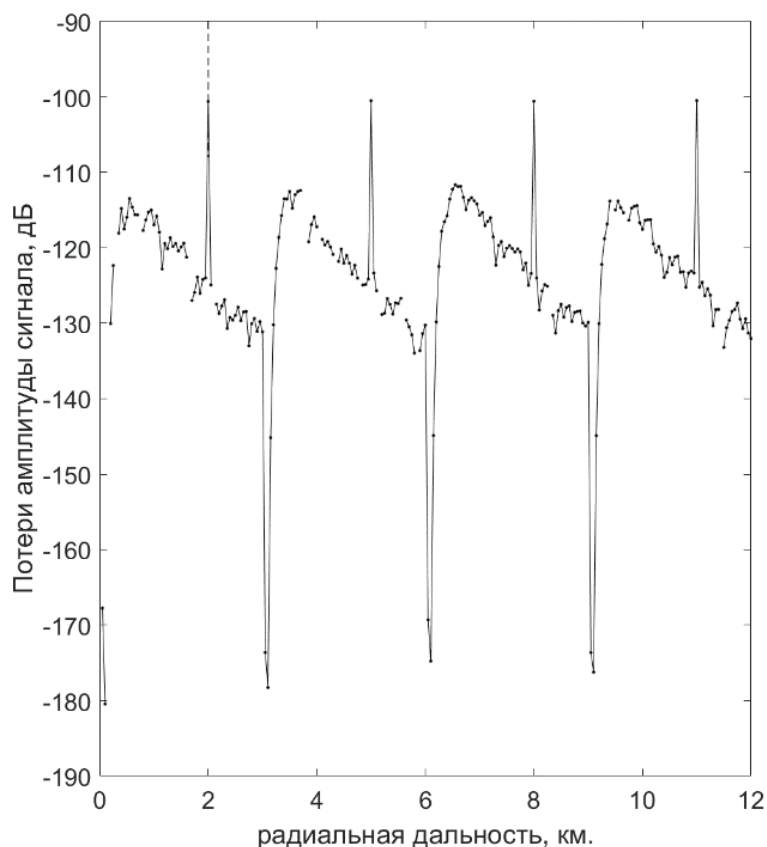


Рис. 12. Пример результатов работы имитатора под углом механического наклона $+10$ град.

4. Интеграция модели в аппаратную платформу

Разработанный имитатор, показанный на рис. 1, реализован в комплексе полунатурного моделирования (КПМ) РИТМ [15]. КПМ РИТМ – это программно-аппаратное решение, позволяющие имитировать сигналы РЛС в жестком реальном времени. На рис. 13 представлен графический интерфейс пользователя по управлению имитатором.

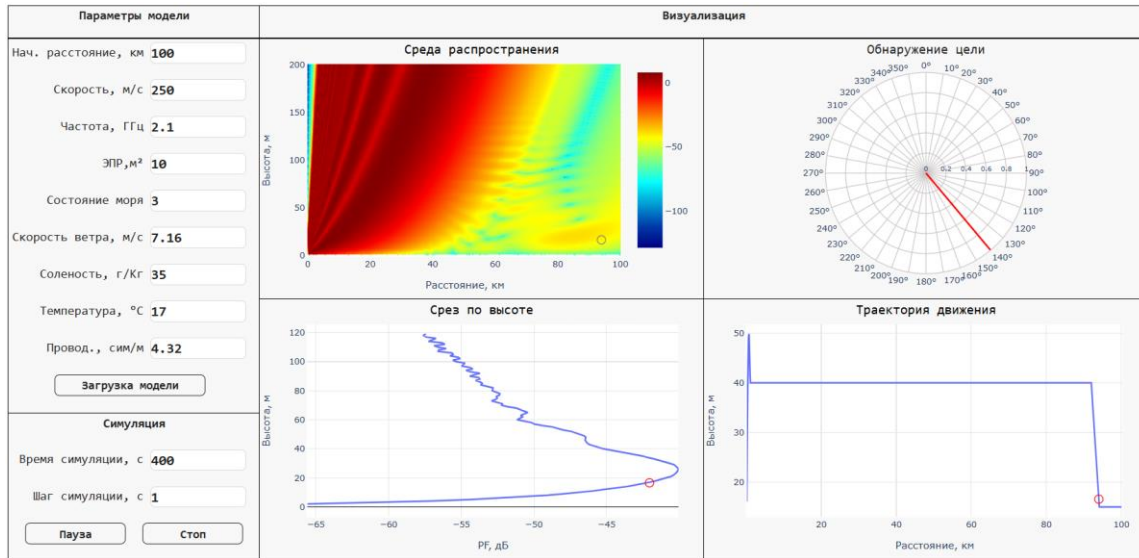


Рис. 13. Интерфейс пользователя по управлению имитатором.

Из рис. 13 видно, что есть возможно загружать сценарий (траекторию) движения цели, в нашем случае – это одна из типовых траекторий противокорабельной крылатой ракеты. Собранный стенд-имитатор показан на рис. 14.



Рис. 14. Стенд-имитатор ФЦО.

Заключение

Представлены основные принципы построения модели имитатора фоно-целевой обстановки распространения радиоволн над морской подстилающей поверхностью. Модель состоит из модулей: построения рельефа морской поверхности, расчета интерференционных провалов при различном волнении моря, расчета профиля показателя преломления, расчета характеристик при дифракции, расчета отраженного сигнала при отсутствии и при наличии цели, расчет профиля приповерхностного и приподнятого волноводов, формирования траектории движения объекта.

Подробно рассмотрен модуль построения рельефа морской поверхности, который сочетает в себе моделирования ЭПР морской поверхности и частотного спектра, в частности, спектра Эльфохейли.

В качестве основного инструмента моделирования распространения радиоволн в работе выступает метод, основанный на параболическом волновом уравнении. Результаты работы метода переставлены в виде расчета фактора распространения при различных условиях (при интерференции, при рефракции, при дифракции). Моделирование осуществлялось в среде ENGEE PTC.

Представлена модель построение имитатора отраженного сигнала от надводной цели, располагающейся над морской поверхностью. Модель интегрирована в аппаратную платформу КПМ РИТМ.

Финансирование: Соглашение №020-11-2025-479 от 27 мая 2025 года о предоставлении российской организации субсидии на финансовое обеспечение мероприятий по проведению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области средств производства электроники, заключенного между Обществом с ограниченной ответственностью «РИТМ» (Получатель субсидии) и Министерством промышленности и торговли Российской Федерации (идентификатор государственного соглашения о предоставлении субсидии 0000000002025PDC0002), заключенного на основании Решения о порядке предоставления субсидии от 14 октября 2024 года №23-

67771-00835-Р согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 25 октября 2023 года №1780 (Правила предоставления субсидии).

Литература

1. Еремка В.Д. Особенности распространения радиоволн над морской поверхностью / В.Д. Еремка, В.А. Кабанов, Ю.Ф. Логвинов, И.М. Мыщенко, В.Б. Разказовский, А.Н. Роечко. Под редакцией В.Б. Разказовский. – Севастополь: Вебер, 2013. – 217 с.
2. Barton D.K. Radar Equations for Modern Radar. – Artech House, 2013 – 448 pp.
3. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. Principles of Modern Radar. – SciTech Publishing, Inc., 2010 – 962 pp
4. Gregers-Hansen V. and Mittal R. «An Improved Empirical Model for Radar Sea Clutter Reflectivity» NRL/MR/5310-12-9346, Apr. 27, 2012.
5. Nathanson F.E., Reilly J.P., and Cohen M.N. Radar design principles, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, 1991.
6. Luke Rosenberg and Simon Watts. Radar Sea Clutter Modelling and target detection. Published by SciTech Publishing, an imprint of The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2022.
<https://doi.org/10.1049/rsn2.12272>
7. Ward, Keith D., Simon Watts, and Robert J.A. Tough. Sea Clutter: Scattering, the K-Distribution and Radar Performance. IET Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 20. London: Institution of Engineering and Technology, 2006.
<https://doi.org/10.1049/PBRA020E>
8. Абузъяров З.К. Морское волнение и его прогнозирование. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 162 с.
9. Bourlier C., Saillard J., Berginc G. Intrinsic Infrared Radiation of the Sea Surface. Progress in Electromagnetics Research. 2000, vol. 27, pp. 185–335.
<https://doi.org/10.2528/PIER99080103>

10. Elfouhaily T.B., Chapron B., Katsaros K.B., Vandemark D.J. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves // J. Geophys. Res. 1997. Vol.107. P. 15781–15796. <https://doi.org/10.1029/97JC00467>
11. Баскаков С.И. Электродинамика и распространения радиоволн: учеб. пособие для вузов по спец. «Радиотехника» / С.И. Баскаков. – М.: Высш. шк., 1992. – 416 с.
12. Gokhan Apaydin, Levent Sevgi. Radio wave propagation and parabolic equation modeling. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2007 – 147 p. <https://doi.org/10.1002/9781119432166.ch3>
13. Ахияров В.В. Метод параболического уравнения в теории дифракции Журнал «Успехи современной радиоэлектроники» №9 за 2010 г.
14. EngEE – Российская платформа математических вычислений и динамического моделирования. <https://start.engEE.com/>
15. КПМ РИТМ – Разработка аппаратного и программного обеспечения. <https://kpm-ritm.ru/>

Для цитирования:

Балакин Д.А., Семенов В.Ю., Стельмах А.П., Тильки И.Г. Имитатор фоно-целевой обстановки над морской подстилающей поверхностью в среде ENGEE PTC // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.7>